

상수관망의 수리학적 지배인자 결정기법 Determination Algorithm of Hydraulic Parameters in Water Distribution System

박 재 홍* · 김 상 현** · 한 건 연***
Park, Jae Hong · Kim, Sang Hyun · Han, Kun Yeun

Abstract

In this paper, the evaluation of diameter, global velocity, global roughness coefficients of the water distribution pipes are examined by using pressure and flowrate measurements in selected points of the network. The selected pipe network parameters are determined through reformulation of the continuity and energy equation. Additional energy equation is considered to analyze the coefficient matrix. The resulting nonlinear equations are solved by using Newton-Raphson method. Three computer models with complex pipe system are used to demonstrate these procedures. The computed results of hydraulic parameters show good agreements with KYPIPE2 flow analysis model.

요 지

본 연구에서는 관망 시스템에서의 관경, 관경 및 전체유속, 유량 및 전체조도계수를 주어진 지점의 압력과 유량값을 이용하여 산정하는 기법을 개발하였다. 선택된 관망의 수리학적 인자들은 연속방정식과 에너지방정식을 재구성함으로써 결정될 수 있었다. 계수메트릭스를 해석하기 위하여 부가적인 에너지방정식이 사용되었다. 복잡한 관로 시스템에 대해 본 연구모형들이 적용되었다. 본 모형의 검증을 위해 계산결과를 KYPIPE2 모형에 역대입한 결과는 서로 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

* 경북대학교 대학원 토목공학과 연구조교
** 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign, Post-Doc
*** 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

현재 급수관망의 관리분야에 사용되는 수치모형은 관망흐름을 해석함으로써 밸브의 개폐와 펌프의 작동시기 등에 대한 효과를 예측하거나 관망내에서 수두손실을 파악하기 위함이다. 수치모형이 정확한 해를 제공하기 위해서는 관경, 유속, 조도계수 등의 관망 특성치들이 정확하게 산정되어야 한다. 그러나 수치해의 정확도와 관련된 이들 관로의 특성치들은 관로의 사용연수에 따라 변화하게 되고 관망검증의 문제를 야기하게 된다.

기존의 연구자들에 의해 제안된 방법들은 관망내의 여러지점에서 나타내는 유량과 압력값을 사용하여 이루어졌다. Walski(1983)와 Ormsbee(1989)는 기지의 유량인 몇 개의 급수전을 개방함으로써 발생하는 다른 관망의 작동조건과 관련하여 압력을 측정하는 방법을 제안하였다. Boulos와 Wood(1990)는 유량과 압력을 측정함으로써 조도계수, 절점 요구량, 관경 등의 여러 가지 관망 계수를 결정하는 방법을 제안하였다. 관로검증 문제는 매우 실제적이고 여러 학자들에 의해 연구되어 왔으나 아직까지 일반화되어 만족할만한 해결책을 제시하지 못하였다(Altman과 Boulos, 1995).

본 연구에서는 관로유량과 절점압력의 측정을 통하여 관망의 연립방정식에 새로운 에너지방정식 혹은 연속방정식을 추가하여 많은 관망 계수들이 직접적으로 결정될 수 있는 방법을 적용하였다. 관망 흐름에서 정상상태를 나타내는 연속방정식과 에너지방정식을 사용하였고 이 식들을 해석하기 위해서 선형화 기법이 도입되었다. 관로내의 조도계수와 관경 등을 검증하기 위하여 이러한 계수들을 특성화할 수 있는 계수메트릭스가 개발되었다.

관망해석에 있어 각 접합절점에 대한 연속방정식은 식 (1)과 같다.

$$\sum(\pm)Q_j - Q_0 = 0 \quad (1)$$

여기서 첨자 j 는 절점에 연결된 관로들을 나타내고, Q_0 는 접합절점에서의 외부 유입이나 유출을 나타낸다. (\pm) 기호는 가정된 흐름방향에 따라 결

정되는데, $(+)$ 부호는 절점으로의 유입을 나타내며 $(-)$ 부호는 절점에서의 유출을 의미한다.

각 폐합관로나 유사폐합관로에 대한 에너지방정식은 식 (2)와 같다.

$$\sum(\pm)_i [W_i - (H_p)_i] + \Delta E = 0 \quad (2)$$

여기서 첨자 i 는 폐합관로나 유사폐합관로를 구성하는 관로를 나타내고, W_i 는 i 관로구간에 대한 동수경사선의 하강치로서 $W = \overline{R} Q^x$ 이다. 여기서 \overline{R} 은 관로상수로서 Hazen-Williams 식의 경우 $\overline{R} = 10.59 L / C^{1.85} D^{4.87}$ 이며 L 은 관로의 등가길이, C 는 Hazen-Williams의 마찰계수, D 는 관경, x 는 지수로서 '2'의 값이다.

H_p 는 펌프나 터빈 등과 같은 관로 구성물로 인한 수두변화를 나타내고 ΔE 는 유사폐합관로에서 가상관로를 따라 시계방향에 따르는 고정수두절점간의 총수두의 차이를 나타내며 폐합관로에 대해서는 '0'의 값이다. 식 (2)에서 만약 관로 흐름이 시계 방향이면 $(+)$ 부호가 사용되고 시계 반대방향이면 $(-)$ 부호가 사용된다(Potter와 Wiggert, 1991). 연속방정식과 에너지방정식은 유량의 향으로 이루어진 식 (3)과 같은 p 개의 연립방정식을 구성하게 된다(Wood와 Funk, 1993 ; Ormsbee와 Wood, 1985)

$$p = j + k \quad (3)$$

여기서 p 는 관로의 갯수, j 는 절점의 수(연속방정식), $k = l + f - 1$ (에너지방정식), l 은 폐합관로의 수, f 는 고정 절점수두의 수이다. 선형화기법에서는 j 개의 연속방정식과 k 개의 에너지방정식을 모두 p 개의 연립방정식으로 포함한다. 이러한 p 개의 연립방정식의 해는 직접적인 계산이 가능하며 각 관로에서 유량이 된다(박재홍 등, 1996).

2. 수리학적 지배인자 결정기법

2.1 관경의 결정

관경결정에 있어서의 기본방정식은 유량의 향으

로 나타난 기존방정식 대신 관경과 유속의 항으로 기술되었다. 따라서 연속방정식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum(\pm)V_i D_i^2 - \frac{4Q_e}{\pi} = 0 \quad (5)$$

여기서 V 는 관로내 유속, D 는 관경을 나타낸다.

식 (5)는 관로유속과 관경의 두 개의 다른 변수를 포함하고 있다. 만약 관로유속이 고정되어 있거나 결정되어 있다면 이 식은 관경의 항인 비선형방정식이 된다. 이 방정식은 1차항까지의 Taylor 급수확장을 통해 식 (6)와 같이 선형화될 수 있다.

$$\sum W_j \hat{D}_j = \sum U_j + \frac{4Q_e}{\pi} \quad (6)$$

여기서 $W_j = 2V_j D_j$, $U_j = V_j D_j^2$ 이고 \hat{D} 는 계산된 관경을 나타낸다.

연속방정식의 경우와 같이 에너지방정식은 역시 관로내 유속과 관경의 항으로 기술된다. 만약 마찰손실이 Hazen-Williams식, 경로나 폐합관로의 미소손실계수의 합이 M 일 때 미소손실항은 $H_m = M V^2 / 2g$, 펌프 에너지가 수두의 항 Z 로 나타내어진다면 에너지방정식은 식 (7)과 같다.

$$\sum k'_m D_i^2 + \sum k_m V_i^2 - \sum \frac{Z_i}{D_i} - \Delta E = 0 \quad (7)$$

여기서 $k'_m = 3.024 L V_i^2 / C^{852}$, g 는 중력가속도, L 은 관로 길이, C 는 Hazen-Williams의 마찰계수, ΔE 는 폐합관로일 경우 '0', 유사 폐합관로일 경우 고정절점간의 수두차이며 첨자 i 는 폐합관로나 경로를 구성하는 관로의 번호를 나타낸다.

만일 관로유속이 고정되어 있다면 에너지방정식은 관경의 항이 비선형항으로 남게 된다. 연속방정식과 같은 방법으로 식 (7)은 Taylor 급수확장을 사용하여 식 (8)과 같이 선형화될 수 있다.

$$\sum G_i \hat{D}_i = \sum (G_i D_i - H_i) + \Delta E \quad (8)$$

여기서 $H_i = k'_m D_i^2 + k_m V_i^2 + Z_i / D_i^2$,

$G_i = bk'_m D_i^2 - 2Z_i / D_i^3$ 이다.

식 (6), (8)을 조합하여 그 결과를 매트릭스 형태로 나타내면 식 (9)와 같다

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ C_{j1} & C_{j2} & \cdots & C_{jn} \\ E_{j+1,1} & E_{j+1,2} & \cdots & E_{j+1,n} \\ E_{j+2,1} & E_{j+2,2} & \cdots & E_{j+2,n} \\ \vdots & & & \vdots \\ E_{j+k,1} & E_{j+k,2} & \cdots & E_{j+k,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_j \\ D_{j+1} \\ D_{j+2} \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_j \\ L_{j+1} \\ L_{j+2} \\ \vdots \\ L_{j+k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 절점 i 에 관로 j 가 연결된 경우는 $C_{ij} = U_j$ 이고 연결되지 않은 경우에는 $C_{ij} = 0$ 이다. k 번째 폐합관로나 경로에 포함된 i 번째 관에 대한 $E_{j+k,i} = G_i$, 관로가 경로내에 있지 않으면 $E_{j+k,i} = 0$ 이다. K_j 는 절점 j 에서의 외부 유출입항이며 $L_{j+k} = \Delta E + \sum (G_i D_i - H_i)$ 이다. 식 (9)는 일반적인 선형해석기법으로 사용하여 계산할 수 있고 해가 수렴할 때까지 반복계산하면 해를 구할 수 있다.

현재의 관망 시스템의 설계를 위해 사용되는 방법은 유량 변수만을 고려하여 설계함으로써 일부 관로에서 관로내 유속저하를 야기하여 관로의 부식 및 수질의 저하를 발생하게 되었다. 본 모형에서는 관로내의 유속을 전체 시스템에 대하여 고정시킴으로 관로내의 유속이 시스템에서의 제한조건으로 작용하게 되어 전체관로에서의 일정한 유속을 얻을 수 있었다.

2.2 관경과 전체유속의 결정

관경과 전체유속 결정에 있어서는 관망방정식을 관경과 유속의 항으로 나타내었다. 이 경우의 모형에서는 유속을 결정변수의 하나로 포함하였다. 각 관로에 대한 유속 변수를 결정하기보다는 관로에 대한 전체유속이 해석되었다. 연립 관망방정식에 여분의 결정변수의 도입은 부가적인 방정식을 필요로 한다. 이 부가적인 방정식은 연속방정식이나 에너지방정식으로 추가함으로 얻어질 수 있다.

부가적인 연속방정식은 고정절점수두에서 사용

되어지며 이 식은 특정한 저류조내로 유입되는 유량을 나타내는데 사용되어질 수 있다. 부가적인 에너지방정식은 고정절점수두와 하나의 내부절점사이 에 적용되어지고 이 방정식은 각각의 절점에서 압력 제약조건식을 나타내는데 사용되어진다.

앞의 경우에서와 같이 연속방정식과 에너지방정식을 먼저 선형화하였다. 두 변수에 대한 함수에 대해 Taylor 급수확장을 적용하여 식 (10)과 같은 관계식을 얻었다.

$$\sum 2D_j \hat{D}_j + \frac{\hat{V}}{V} \sum D_j^2 = \sum 2D_j^2 + \frac{4Q_e}{\pi V} \quad (10)$$

여기서 \hat{D} 과 \hat{V} 은 각각 계산된 관경과 전체유속에 나타낸다.

마찬가지로 에너지식을 관경과 유속에 대한 Taylor 급수확장을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum \left(S_i \hat{D}_i + T_i \hat{V} + 2k_{mi} V \hat{V} + \frac{2Z_i \hat{D}_i}{V_i D_i^3} + \frac{Z_i \hat{V}_i}{V^2 D_i^2} \right) \\ & = \sum \left(S_i D_i + T_i V - k''_{\mu} D_i^b V^a - \frac{4Z_i}{V D_i^2} + \Delta E \right) \quad (11) \end{aligned}$$

여기서 $S_i = b k''_{\mu} D_i^{b-1} V^a$, $k''_{\mu} = 3.024 L_i / C^{1.852}$, $T_i = a k''_{\mu} D_i^b V^{a-1}$ 이다.

부가된 연속방정식은 식 (10)과 같은 형태로 나타나게 된다. 이 방정식은 일정한 압력에서 시스템으로의 유출입을 나타내기 위해 고정수두절점에서 사용되어야 한다. 부가된 에너지방정식은 식 (11)과 형태로 나타나는데 이 식은 고정절점으로부터 수두조건이 제시된 특정절점까지 사용되어야 한다. 요구되는 압력은 ΔE 에 대한 적절한 값의 선택에 의해 결정되어진다.

$$\begin{pmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,n} & C_{1,n+1} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \cdots & C_{2,n} & C_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ C_{j,1} & C_{j,1,2} & \cdots & C_{j,n} & C_{j,n+1} \\ E_{j+1,1} & E_{j+1,2} & \cdots & E_{j+1,n} & E_{j+1,n+1} \\ E_{j+2,1} & E_{j+2,2} & \cdots & E_{j+2,n} & E_{j+2,n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ E_{j+k,1} & E_{j+k,2} & \cdots & E_{j+k,n} & E_{j+k,n+1} \\ E_{j+k+1,1} & E_{j+k+1,2} & \cdots & E_{j+k+1,n} & E_{j+k+1,n+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_j \\ D_{j+1} \\ \vdots \\ D_{j+k} \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_j \\ L_{j+1} \\ \vdots \\ L_{j+k} \\ L_{j+k+1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

연속방정식, 에너지방정식 및 부가된 에너지방정식을 매트릭스로 기술하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

식 (10)으로 부터 관경항에 대한 연속방정식에서 유도된 계수들은 다음과 같다. 관로 j가 절점 i에 연결된 경우 $C_{ij} = 2D_j$ 이며 관로 j가 절점 i에 연결되지 않은 경우 $C_{ij} = 0$ 이다. 연속방정식으로부터 유속항에 대해서 유도된 계수 $C_{i,n+1} = \sum D_j^2 / V_j$ 이다.

식 (11)으로부터 관경항에 대해서 에너지방정식에서 유도된 계수는 관로 i가 경로 k내에 있는 경우 $E_{j+k,i} = S Z_i + 2V_i D_i^3$ 이고 관로 i가 경로 k내에 있지 않은 경우에는 $E_{j+k,i} = 0$ 이다. 유속항에 대한 에너지방정식을 적용한 계수항은 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$E_{j+k,n+1} = T_i + 2k_{mi} V_i + Z_i / V_i^2 D_i^2 \quad (13)$$

식 (13)의 우측항에서 연속방정식과 에너지방정식에 대한 각각의 계수들은 식 (10), (11)로부터 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_j = \sum 2D_j^2 + \frac{4Q_e}{\pi V_j} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} L_{j+k} = & \sum \left(S_i D_i + T_i V_i - k''_{\mu} D_i^b V_i^a - \frac{4Z_i}{V_i D_i^2} \right) \\ & + \Delta E \quad (15) \end{aligned}$$

초기 관경과 전체유속으로부터 C , E , K , L 항들이 각각 결정된다. 일단 이 값들을 알면 개선된 관경과 전체유속이 주어진 연립방정식을 해석함으로 결정될 수 있다. 앞의 경우와 마찬가지로 관경과 전체유속이 일정한 해에 수렴할 때까지 계산과정이 반복된다.

2.3 유량 및 전체 조도계수의 결정

유량 및 전체 조도계수 결정에서는 일반적인 관망방정식에 조도계수를 결정하기 위하여 전체 조도계수가 결정변수로 부가되었다. 기존의 조도계수의

검증기법은 가정된 조도계수를 유량해석 모형에 반복적으로 입력하고 계산결과치와 주어진 유량자료를 비교함으로써 조도계수를 결정하였다. 본 연구에서는 직접적으로 조도계수를 결정하기 위해 추가적인 에너지방정식이 사용되었다. 연속방정식은 선형방정식이므로 에너지방정식만 유량과 조도계수와 의 두 결정변수에 대하여 식 (16)과 같이 Taylor 급수확장을 통하여 선형화하였다.

$$g(Q, C) = f(Q, C) + \frac{\partial f(Q, C)}{\partial Q}(\hat{Q} - Q) + \frac{\partial f(Q, C)}{\partial C}(\hat{C} - C) = 0 \quad (16)$$

여기서 \hat{Q} 과 \hat{C} 은 각각 계산된 유량과 전체조도를 나타낸다.

식 (16)에 에너지방정식인 식 (2)를 대입하여 정리하면 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum \left\{ (k''''_{\mu} Q_i^{q-1} C^b + 2K_m Q_i - \frac{Z_i}{Q_i}) \hat{Q}_i \right\} \\ & + \sum b k''''_{\mu} Q_i^q C^{b-1} \hat{C} \\ & + \sum \{ (1-a-b) k''''_{\mu} Q_i^q C^b - k_m Q_i^2 + 2Z_i \} \\ & - \Delta E = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 Z는 펌프의 수두, $k''''_{\mu} = 10.59 L/D^{4.87}$ 이다.

이제 연속방정식, 선형화된 에너지방정식들을 이용하여 p+1개의 연립방정식을 구성할 수 있고 이것을 매트릭스 형태로 나타내면 식 (18)과 같다.

$$\begin{pmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \dots & C_{1,n} & C_{1,n+1} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \dots & C_{2,n} & C_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ C_{j,1} & C_{j,2} & \dots & C_{j,n} & C_{j,n+1} \\ E_{j+1,1} & E_{j+1,2} & \dots & E_{j+1,n} & E_{j+1,n+1} \\ E_{j+2,1} & E_{j+2,2} & \dots & E_{j+2,n} & E_{j+2,n+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ E_{j+k,1} & E_{j+k,2} & \dots & E_{j+k,n} & E_{j+k,n+1} \\ E_{j+k+1,1} & E_{j+k+1,2} & \dots & E_{j+k+1,n} & E_{j+k+1,n+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_j \\ Q_{j+1} \\ Q_{j+2} \\ \vdots \\ Q_n \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_j \\ L_{j+1} \\ L_{j+2} \\ \vdots \\ L_{j+k} \\ L_{j+k+1} \end{pmatrix} \quad (18)$$

여기서 C_{ij} 는 절점 i에 관로 j가 존재할 경우는 ± 1 의 값으로서 유출일 경우 양의 값, 유입일 경우

음의 값을 나타낸다. 절점 i에 관로 j가 존재하지 않을 경우와 $C_{i,n+1}$ 값도 0이 된다. 식 (18)의 왼편항인 에너지방정식의 유량항 $E_{j+k,i}$ 는 k번째 폐합관로나 경로에 관로 i가 포함되어 있을 경우는 식 (19)와 같다.

$$E_{j+k,i} = k''''_{\mu} Q_i^{q-1} C^b + 2K_m Q_i - \frac{Z_i}{Q_i} \quad (19)$$

관로 i가 k번째 폐합관로나 경로에 포함되어 있지 않을 경우에는 $E_{j+k,i}$ 의 값은 0 이고 조도계수의 항 $E_{j+k,n+1}$ 는 $b k''''_{\mu} Q_i^q C^{b-1}$ 이다. 식 (18)의 우측항인 K_j 는 절점 j에서의 외부 유출입량이며 L_{j+k} 는 식 (20)과 같다.

$$L_{j+k} = \Delta E - \sum \{ (1-a-b) k''''_{\mu} Q_i^q C^b - k_m Q_i^2 + 2Z_i \} \quad (20)$$

여기서 구성되는 계수메트릭스도 선형해석방법으로 풀 수 있다.

3. 적용 및 검토

3.1 관경의 결정

그림 1과 같은 9개의 관로와 2개의 저수지로 이루어진 비교적 단순한 관망에 대하여 각 해석기법에 의한 수치모형이 적용되었다. 본 모형의 검증을 위해 주어진 시스템에 대해 모형의 결과를 유량해석 모형의 입력자료로 이용하였다. A 저수지의 수

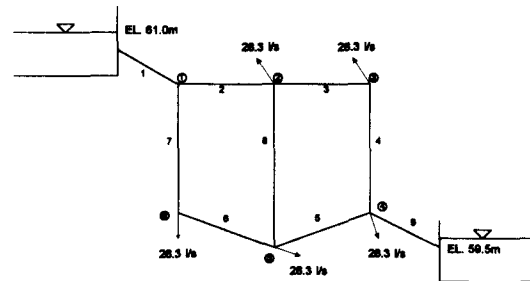


그림 1. 9개 관로 시스템 구성도

위는 61.0m 이고 B 저수지의 수위는 59.5m 이다. 외부 유출량은 절점 2, 3, 4, 5에서 각각 28.3 ℓ/sec였고 각 관들에 대한 Hazen-Williams의 계수는 120이었으며 각 관로의 길이 및 초기유속은 표 1에서 나타나 있다.

최대 반복계산 횟수는 20회로 부여하였으며 충분한 반복계산이 이루어진 후 수렴한계 내에서 본 모형의 계산된 관경과 유속과 관경결정모형의 결과를 이용한 유량해석모형의 결과는 표 1과 같다. 표에서 보는 바와 같이 관경 결정기법에서 결정된 관경들을 검증하기 위해 기존의 유량 해석모형에 역대입한 결과 관경 결정기법의 유속과 유량들이 유량해석 모형의 결과와 잘 일치하고 있었다.

표 1. 관경 결정기법 적용결과

관로 번호	길이 (m)	본 연구 모형			KYPipe2		
		관경 (cm)	유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)	관경 (cm)	유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)
1	305	48.165	0.500	90.966	48.165	0.50	91.10
2	152	39.560	0.500	61.322	39.560	0.50	61.46
3	152	28.763	0.500	32.450	28.763	0.50	32.49
4	213	10.328	0.500	4.162	10.33	0.50	4.19
5	274	25.873	0.500	26.385	25.87	0.50	26.29
6	183	5.847	0.500	1.345	5.85	0.50	1.34
7	92	27.474	0.500	29.644	27.47	0.50	29.64
8	122	4.135	0.500	0.595	4.13	0.50	0.67
9	244	35.825	0.500	50.540	35.82	0.50	50.40

3.2 관경 및 전체유속의 결정

그림 1과 같은 9개 관로 시스템이 각 관로의 관경 및 전체유속 결정을 위해 적용되었고 초기유속은 임의로 주어졌다. 추가된 조건은 절점 5에서 수두가 57.30m 이었다. 수렴한계에 도달한 각 관로의 관경과 전체유속은 표 2와 같다. 표 2에서도

표 2. 관경 및 전체유속 결정기법 적용결과

관로 번호	길이 (m)	본 연구 모형			KYPipe2		
		관경 (cm)	유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)	관경 (cm)	유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)
1	400	30.139	0.930	66.023	30.14	0.93	66.22
2	200	16.896	0.930	20.829	16.90	0.93	20.94
3	200	14.354	0.930	14.971	14.35	0.93	14.99
4	250	13.479	0.930	13.244	13.48	0.93	13.30
5	300	21.468	0.930	33.366	21.47	0.93	33.67
6	250	15.334	0.930	17.065	15.33	0.93	17.26
7	100	24.956	0.930	45.223	24.96	0.93	45.56
8	150	17.556	0.930	22.300	17.56	0.93	22.64
9	215	32.098	0.930	74.769	32.10	0.93	75.27

본 기법에서 결정된 유량 및 새로운 변수로 추가된 관로유속이 유량해석모형의 역대입한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

3.3 유량 및 전체 조도의 결정

그림 1과 같은 9개 관로 시스템에 유량과 조도 계수가 동시에 결정되기 위해 본 모형이 적용되었다. 일반적으로 조도계수는 관의 사용년수에 따라 변화되기 때문에 시스템 전체가 동시에 설치되었다면 전체 조도계수가 일정하다고 가정할 수 있다. 주어진 관경과 관로길이는 다음과 같다. 마찬가지로 절점 5에서 수두가 59.67m의 제한조건으로 에너지방정식 조건이 추가되었다. 수렴한계에 도달한 각 관로의 유량과 전체 조도계수는 표 3과 같다. 표에서 보는 바와 같이 유량 및 조도계수의 결정에 있어서도 본 기법을 사용하여 시스템의 수리학적 조도계수가 작은 오차범위내에서 결정됨을 알 수 있었다.

표 3. 9개 관로에 대한 유량 및 조도계수 결정기법 적용결과

관로 번호	길이 (m)	관경 (cm)	본 연구 모형			KYPipe2		
			유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)	조도 계수	유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)	조도 계수
1	400	8.7	1.023	251.111	99.98	1.023	251.11	100.0
2	200	8.7	0.540	132.381	99.98	0.540	132.38	100.0
3	200	8.7	0.338	82.855	99.98	0.338	82.855	100.0
4	250	8.7	0.223	54.538	99.98	0.222	54.538	100.0
5	300	8.7	0.340	83.308	99.98	0.340	83.308	100.0
6	250	8.7	0.369	90.416	99.98	0.368	90.388	100.0
7	100	8.7	0.484	118.733	99.98	0.484	118.704	100.0
8	150	8.7	0.086	21.209	99.98	0.086	21.238	100.0
9	215	8.7	0.446	109.530	99.98	0.446	109.530	100.0

3.4 실제 관로시스템에 대한 적용

본 모형이 그림 2와 같이 35개 관로, 16개의 절점과 3곳의 고정수위 절점을 가진 관로 시스템에 대한 조도계수를 결정하기 위하여 적용되었다. 실제 관로시스템에의 적용에 있어서는 이미 매설되어 있는 시스템이므로 관경과 관로길이는 알고 있는 상황이었다. 관로의 조도계수는 여러번에 걸친 시스템의 확장으로 인해 관로별 각기 다른 조도계수를 결정하여야 했다. 각각의 조도계수를 결정하기

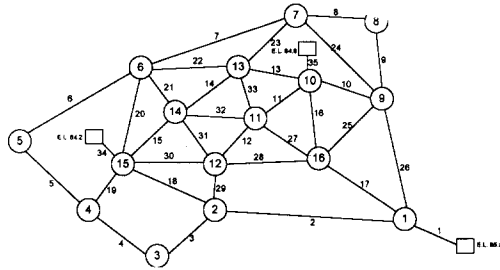


그림 2. 실제 관로 시스템 구성도

위해 관로내 조도계수는 관로의 사용기간에 따라 변화한다고 가정하였고 동일 시기의 확장된 관로들에 따라 조도계수의 그룹을 결정하였다. 시스템의 설치시기가 동일한 관로들의 조도계수를 동일한 값으로 가정하여 확장횟수에 따라 5개의 조도계수값으로 설정하였다. 설정된 5개의 조도계수를 계산하기 위해 임의의 절점 4, 7, 10, 13, 16 지점에서 수두를 측정하였고 그 값들은 각각 83.736, 84.207, 84.665, 84.221, 84.480 m이었다. 각 관로에 대한 관경 및 관로길이가 표4에서 제시되어졌

표 4. 실제 시스템에 대한 유량 및 조도계수 결정기법 적용결과

관로 번호	길이 (m)	관경 (cm)	본 연구모형			KYPIPE2		
			유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)	조도 계수	유속 (m/s)	유량 (ℓ/s)	조도 계수
1	200	40.6	0.482	62.340	120.19	0.483	62.48	120
2	3657	40.6	0.148	19.222	120.19	0.150	19.46	120
3	1830	20.3	0.234	7.567	97.60	0.237	7.68	100
4	1830	20.3	0.152	4.933	131.15	0.149	4.82	130
5	1830	20.3	0.196	6.354	131.15	0.197	6.37	130
6	3656	20.3	0.190	6.146	131.15	0.189	6.13	130
7	3656	20.3	0.043	1.406	131.15	0.043	1.39	130
8	1830	25.4	0.112	5.687	120.19	0.112	5.67	120
9	1830	25.4	0.112	5.687	120.19	0.112	5.67	120
10	1830	25.4	0.114	5.774	120.19	0.114	5.78	120
11	1830	25.4	0.139	7.024	79.78	0.139	7.04	80
12	1830	25.4	0.013	0.684	79.78	0.013	0.67	80
13	1830	30.5	0.150	10.928	79.78	0.150	10.95	80
14	1830	25.4	0.070	3.541	97.60	0.071	3.60	100
15	1830	20.3	0.050	1.628	97.60	0.051	1.65	100
16	1830	30.5	0.093	6.811	79.78	0.094	6.83	80
17	3657	40.6	0.170	22.031	120.19	0.170	21.98	120
18	1830	25.4	0.148	7.497	97.60	0.149	7.57	100
19	1830	25.4	0.223	11.287	131.15	0.221	11.19	130
20	1830	20.3	0.055	1.777	131.15	0.055	1.77	130
21	1830	20.3	0.036	1.179	131.15	0.035	1.13	130
22	1830	25.4	0.082	4.142	131.15	0.081	4.10	130
23	1830	25.4	0.031	1.573	120.19	0.031	1.59	120
24	2743	25.4	0.131	6.645	120.19	0.131	6.63	120
25	2743	30.5	0.028	2.029	79.78	0.028	2.02	80
26	3657	40.6	0.163	21.087	120.19	0.163	21.05	120
27	1830	25.4	0.106	5.391	79.78	0.106	5.39	80
28	1830	30.5	0.178	12.981	120.19	0.177	12.94	120
29	1830	20.3	0.128	4.158	97.60	0.130	4.20	100
30	1830	30.5	0.001	0.074	97.60	0.002	0.11	100
31	1830	30.5	0.053	3.882	79.78	0.053	3.86	80
32	1830	25.4	0.045	2.270	79.78	0.045	2.26	80
33	1830	25.4	0.033	1.671	79.78	0.033	1.66	80
34	100	30.5	0.097	7.122	109.87	0.095	6.92	110
35	150	30.5	0.418	30.537	109.87	0.419	30.60	110

다. 본 모형의 결과의 검증을 위해 KYPIPE2에 본 연구모형의 결과의 조도계수와 비슷한 값을 입력하여 각 관에서의 유속과 유량을 계산하였는데 본 연구모형에 의한 결과와 일치함을 알 수 있었고 그 결과는 표 4에 잘 나타나 있다. 따라서 본 모형은 다양한 조도계수가 존재하는 복잡한 실제 관망에서도 비교적 적은 오차범위 내에서 유량 및 조도계수를 잘 계산하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 상수관로 시스템의 정상상태에서 선형화기법을 이용하여 관경과 관로유속, 유량과 조도계수를 직접적으로 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 정상상태 해석을 위해서 연속방정식과 에너지방정식에 부가적인 에너지방정식을 이용하였다. 관망시스템에서 수리학적 인자를 특성화할 수 있는 계수메트릭스를 해석하기 위해 주어진 비선형방정식을 선형화기법을 이용하였고 이 메트릭스를 통하여 관경 및 전체 관로유속, 유량 및 조도계수를 직접적으로 해석하였다. 여러 가지 관로시스템에 대해 관경 결정모형, 관경-관로유속 결정모형, 유량-조도계수 결정 모형들이 각각 적용되었다. 각각의 관로시스템에 대해 각 모형들이 적용된 결과는 실제의 경우와 비교하여 합리적인 결과를 제시하였고 일반적인 유량해석 모형에 본 모형들의 해를 다시 역대입한 결과 본 연구모형들은 기존의 유량모형의 결과치와 동일하여 본 모형의 수렴성을 확인할 수 있었다.

본 연구모형은 복잡한 실제 관로에서 기존 상수관로의 유지보수 기법의 개발에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

박재홍, 한건연 (1996). "Frontal 기법을 이용한 상수관망의 흐름해석 모형." 한국수자원학회지, 제29권, 제1호, pp. 141-150.
 Altman, T., and Boulos, P.F., (1995). "Solving flow-constrained networks : inverse problem." *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 121, No. 5,

- pp. 427-431.
- Bolous, P.F., and Wood, D.J. (1990). "Explicit calculation of pipe network parameters." *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 11, pp. 1329-1344.
- Ormsbee, L.E., and Wood, D.J. (1985). "Hydraulic design algorithms for pipe networks." *J. of Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, No. 12, pp. 1195-1207.
- Ormsbee, L.E. (1989). "Implicit network calibration." *J. of Water Res. Plan. & Mang.*, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp. 243-257.
- Potter, M.C., and Wiggert, D.C. (1991). *Mechanics of fluids*, Prentice-Hall.
- Walski, T.M. (1983). "Technique for calibrating network models." *J. of Water Res. Plan. & Mang.*, ASCE, Vol. 109, No. 4, pp. 360-372.
- Wood, D.J., and Funk, J.E. (1993). "Hydraulic analysis of water distribution systems." *Water supply systems-state of the art and future trends*, E. Cabrera and F. Martinez, eds., Computational Mechanics Publications, pp. 43-85.

〈접수: 1996년 8월 8일〉